

ТЕПЛОВИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В. М. Славков, О. П. Давиденко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

E-mail: sliva@meta.ua, leo.46@mail.ru

Доведена можливість використання цифрового фотоапарата для розв'язання задач теплового неруйнівного контролю та визначення теплоємності металевих об'єктів, температура яких перевищує 600°C. Розроблені методики досліджень, обладнання та алгоритми обробки результатів для виявлення та ідентифікації внутрішніх дефектів у зразках і визначення теплоємності. Встановлена залежність усередненого значення температури поверхні над дефектом та кількості інформативних пікселів цифрового зображення теплового випромінювання від поверхневої площі дефекту.

Ключові слова: *тепловий неруйнівний контроль, індукційний нагрівач, газовий нагрівач, цифровий фотоапарат, інтерференційний фільтр, яскравісна температура, температурні аномалії, питома масова теплоємність, алгоритм обробки, роздільна здатність.*

THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING AND METALS HEAT CAPACITY DETERMINING AT HIGH TEMPERATURES

V. M. Slavkov, A. P. Davidenko

National technical university "Kharkiv polytechnic institute"

The possibility of using a digital camera to meet the challenges of thermal nondestructive testing and determination of the specific heat of metal objects whose temperature exceeds 600°C is proved. The methods of research, equipment and data processing algorithms for detection and identification of internal defects in the samples and heat capacity determination are developed. The dependence of the average surface temperature above the defect and the number of pixels of informative digital image of the thermal radiation on the defect surface area is established. It was experimentally proved that the maximum relative error of measurement of the iron heat capacity by the proposed method is 2.54%.

Keywords: *thermal nondestructive testing, induction heater, a gas heater, a digital camera, an interference filter, the brightness temperature, temperature anomalies, the specific heat capacity of the mass, the algorithm processing solution.*

Будь-яке тіло з температурою, відмінною від абсолютного нуля, є джерелом теплового випромінювання. За безпосереднім зв'язком інтенсивності теплового випромінювання тіла з його температурою, обґрунтованим у законах теплового випромінювання Стефана–Больцмана, Планка, Віна, можна дистанційно вимірювати (контролювати) температуру, реєструючи теплове випромінювання цифровим фотоапаратом (ЦФ) [1–3]. Суть цифрового фотографічного методу теплового контролю металів за високих температур – реєстрація надлишкових температурних полів, що виникають на поверхні контролюваного металу під впливом зовнішнього теплового впливу, і виявлення локальних температурних аномалій, що свідчать про приховані дефекти [4, 5]. Спосіб визначення теплоємності металів полягає у вимірюванні їх температури за допомогою ЦФ упродовж деякого інтервалу часу. Втрати тепла зразком враховують за кривою охолодження, яка містить інформацію про теплоємність металу у певному інтервалі температур [6].

Застосування методів теплового контролю, заснованих на використанні ЦФ [7–11], обмежене через відсутність вітчизняної нормативної бази, а також методик обробки цифрових фотографій температурних полів, що дають можливість ідентифікувати дефекти і встановити теплоємність металу в певному інтервалі температур. Це і зумовило мету дослідження.

© В. М. Славков, О. П. Давиденко, 2015

Тепловий контроль. Виконували тепловий неруйнівний контроль металів, використовуючи ЦФ Canon EOS 20D, який має високу роздільну здатність (8 мегапікселів), забезпечує ручне налаштування параметрів (чутливість, діафрагма, витримка) та допускає встановлення на об'єктиві Helios 44M-4 вузькосмугового інтерференційного фільтра (довжина хвилі 610 ± 10 нм, напівширина < 12 нм, пропускання 75%, діаметр 20 мм).

Досліджували зразки зі сталі марки Ст3пс двох геометричних форм (рис. 1) зі штучними дефектами діаметрів $d = (0,50; 0,75; 1,00; 1,25)$ мм і глибин свердлування $l = (10; 15)$ мм. Геометричні розміри зразків H_1, H_2, D_1, D_2, W підібрали так, щоб їх об'єми були однакові.

Експериментальна установка подана на рис. 2. ЦФ закріпили на штативі для запобігання вібрацій і підключили до персонального комп'ютера (ПК). Під час експерименту використовували односторонній метод теплового контролю, тобто фотографували протилежну до поверхні свердлування поверхню. Відстань від ЦФ до поверхні фотографування зразків 1 м. Нагрівали зразки спеціально розробленим індукційним нагрівачем змінного струму високої частоти (потужність нагрівача 2 кВт, діапазон робочих частот 60...300 кГц) до температур 700...750°C за частоти $f = 130...150$ кГц. Вимірювальними приладами (рис. 2, поз. 6, 7) контролювали параметри його роботи.

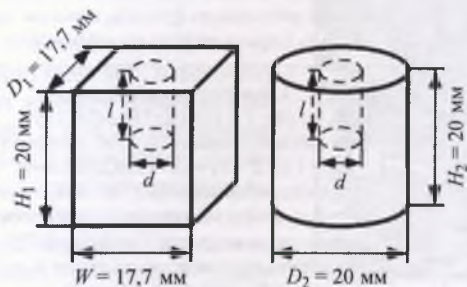


Рис. 1.



Рис. 2

Рис. 1. Досліджувані зразки.

Рис. 2. Експериментальна установка: 1 – ЦФ CANON 20D; 2 – об'єктив HELIOS-44M-4; 3 – зразок досліджуваного металу; 4 – індуктор; 5 – ІН; 6 – цифровий частотомір ЧЗ-54; 7 – осцилографи С1-107, С1-112А та цифровий мультиметр М890F; 8 – інтерференційний фільтр.

Після досягнення необхідної температури нагрівання індукційний нагрівач відключали і починали серійне знімання (20 кадрів) охолодження зразків, інтервал зйомки $\Delta t_s = 1,5$ с, витримка $\Delta t_e = 1$ с, світлочутливість ISO 200. Освітленість зразків під час фотографування не перевищувала значення $E_v = 10$ лк. Накопичені в пам'яті ЦФ фотографії передавали лінією зв'язку (USB 2.0) на ПК, де їх обробляли та систематизували за допомогою програмного забезпечення в середовищі MathCAD. Для аналізу обрали область 450×450 пікселів в центрі кадру.

Алгоритм обробки передбачає перехід від інформативного параметра R (канал червоного цифрового зображення) спочатку до яскравісної температури T_b за допомогою встановленої під час калібрування ЦФ (рис. 3) залежності $T_b = f(R)$ (рис. 4, крива 1), а потім – до істинного значення температури поверхні зразків T_{st} з урахуванням коефіцієнта випромінювальної здатності сталі $\epsilon_{st} = 0,43$ [3] за

такою залежністю [12]:

$$\frac{1}{T_{St}} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda_0}{c_2} \ln \epsilon_{St}(\lambda_0, T_{St}), \quad (1)$$

де T_{St} – істинна термодинамічна температура поверхні зразків, К; T_b – яскравісна температура, К; $c_2 = 0,01439 \text{ м} \cdot \text{К}$ – друга стала випромінювання; λ_0 – довжина хвилі інтерференційного фільтра, м; $\epsilon_{St}(\lambda_0, T_{St})$ – коефіцієнт випромінювальної здатності сталі (або коефіцієнт сірості).

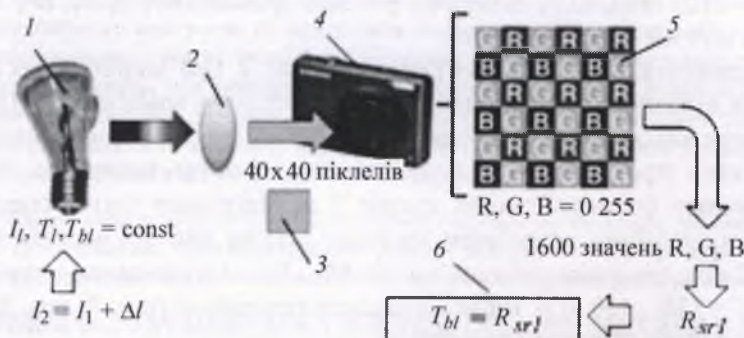


Рис. 3. Процедура калібрування ЦФ: 1 – температурна лампа TRV 1100-2350; 2 – вузькосмуговий інтерференційний фільтр на довжину хвилі 610 нм; 3 – область зображення вольфрамової стрічки; 4 – ЦФ; 5 – матриця ЦФ; 6 – рівняння, за яким встановлено функцію взаємозв'язку $T_b = f(R)$; R, G, B – 0...255 канали червоного, зеленого та синього цифрового зображення.

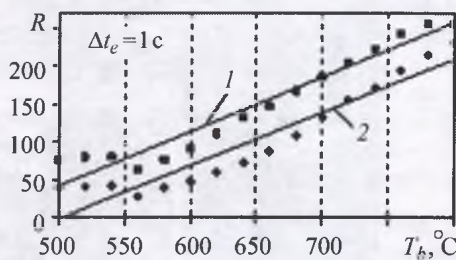


Рис. 4. Калібрувальні залежності $T_b = f(R)$: 1 – $T_b = (R + 315,64)/0,7151$ (для світлочутливості ISO 200, витримка $\Delta t_e = 1 \text{ с}$); 2 – $T_b = (R + 350,29)/0,6988$ (для світлочутливості ISO 100, витримка $\Delta t_e = 1 \text{ с}$). I – струми лампи для діапазону яскравісних температур $T_b = 500 \dots 800^\circ\text{C}$ із калібрувальної залежності лампи за допомогою функції *predict* програмного пакета MathCAD.

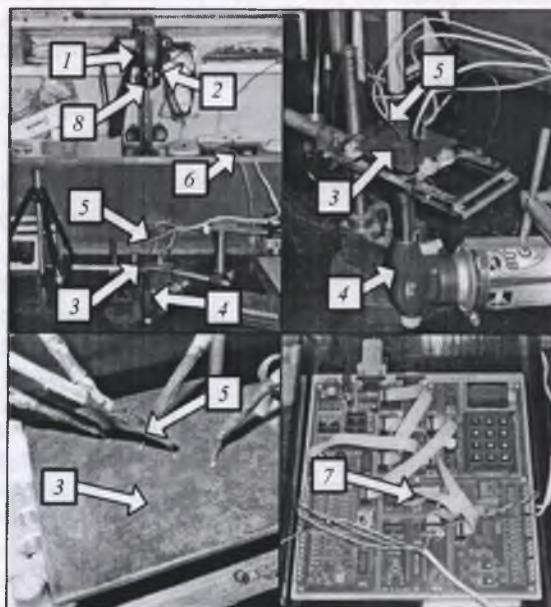
Визначення теплоємності металів. Під час експериментів з визначення питомої масової теплоємності металів використовували ЦФ Canon EOS 20D. В основі способу – метод визначення теплоємності металів під час охолодження [6]. Згідно з ним необхідно мати зразок металу, теплоємність якого у певному інтервалі температур відома. Для цього обрали мідь та прийняті значення її теплоємності в інтервалі температур $600 \dots 700^\circ\text{C}$, рекомендовані КОДАТА-МЧНС [13].

Геометричну форму зразка з невідомою теплоємністю (заліза) та з відомою (міді) обрали з умови однакових їх об'ємів $V_{\text{Cu}} = V_{\text{Fe}}$. Розміри пластин такі: ширина та довжина 65 мм, товщина 2 мм. Заздалегідь визначали хімічний склад зразків портативним спектрометром “СПРУТ”, стандартне відхилення якого складає $10^{-3} \dots 10^{-2}$, а абсолютна похибка визначення вмісту компонентів не перевищує 1 мас.%, та їх масу (електронні ваги AXIS AD 100, клас точності III, ціна поділки 0,001 г) (див. таблицю).

Схему виконання експерименту ілюструє рис. 5. ЦФ кріпили на штативі для запобігання вібрацій і підключали до ПК. Відстань від ЦФ до поверхні фотографування 1 м. Нагрівали зразки до температур $T_h = 700 \dots 750^\circ\text{C}$ за допомогою регульованого газового нагрівача TORCH WS-503C (паливо – газ бутан, діаметр горілки 39 мм, номінальна теплова потужність 1,65 кВт, максимальна температура нагріву 1300°C , висота сфокусованого полум'я 10...50 мм).

Зразки	Хімічний склад, мас.%	Маса, г
З міді	Мідь, концентрація 99,988 (похибка вимірювання $\pm 0,445078$); цинк, концентрація 0,012 (похибка вимірювання $\pm 0,006081$)	71,681
З заліза	Залізо, концентрація 99,893 (похибка вимірювання $\pm 0,660142$); марганець, концентрація 0,107 (похибка вимірювання $\pm 0,04383$)	63,145

Рис. 5. Установка для визначення теплосмості металів:
1 – цифровий фотоапарат;
2 – об'єктив Helios 44М-4;
3 – зразок; 4 – нагрівач TORCH WS-503C; 5 – чотири термопар (тип ТХА); 6 – перетворювач сигналів термопар; 7 – лабораторний стенд AVR-MICROLAB; 8 – інтерференційний світлофільтр.



Установка містила чотириканальний перетворювач сигналів термопар (ТС) (рис. 5, поз. 6), які встановлювали на поверхні зразків на відстані 10 мм одна від одної, для порівняння значень істинних термодинамічних температур поверхонь зразків з міді T_{CuTC} та заліза T_{FeTC} з отриманими ЦФ T_{Cu} , T_{Fe} . Синхронізували процеси фотографування поверхонь зразків та аналого-цифрового перетворення значень термо-

е.р.с., отриманих з термопар (рис. 5, поз. 5), за розробленим алгоритмом програмного забезпечення LabVIEW та стенда AVR-MICROLAB (рис. 5, поз. 7).

Після досягнення необхідної температури нагрівання поверхонь зразків газовий нагрівач відключали та починали серійну зйомку (30 кадрів) їх охолодження, інтервал зйомки $\Delta t_s = 1,5$ с, витримка $\Delta t_e = 1$ с, світлочутливість ISO 100. Освітленість під час фотографування також не перевищувала значення $E_v = 10$ лк. Цифрові фотографії мали таку ж роздільну здатність та передавалися лінією зв'язку (USB 2.0) на ПК, де їх обробляли та систематизували за розробленим алгоритмом для програмного забезпечення MathCAD.

В алгоритм спочатку вводили основні константи теплового випромінювання та маси зразків міді m_{Cu} і заліза m_{Fe} , потім встановлювали координати точок на поверхнях зразків для їх аналізу (три точки, 5×5 пікселів, всього 75 пікселів).

У цьому алгоритмі відбувається перехід від інформативного параметра R спочатку до яскравісної температури T_b за встановленою після калібрування ЦФ (рис. 3) залежністю $T_b = f(R)$ (рис. 4, крива 2), а потім – до істинного значення температури поверхонь зразків міді T_{Cu} та заліза T_{Fe} з урахуванням коефіцієнтів випромінювальної їх здатності $\epsilon_{Cu} = 0,87$ та $\epsilon_{Fe} = 0,40$ за формулою (1).

Оскільки зразки мають різну теплоємність, швидкість охолодження їх поверхонь так само різна, тобто, згідно із запропонованим способом, необхідно розрахувати співвідношення

$$(\Delta T_{\text{Cu}}/\Delta t_s)_3, (\Delta T_{\text{Cu}}/\Delta t_s)_4, \dots, (\Delta T_{\text{Cu}}/\Delta t_s)_i, i = 3 \dots 15 \text{ – для зразка міді}$$

та $(\Delta T_{\text{Fe}}/\Delta t_s)_3, (\Delta T_{\text{Fe}}/\Delta t_s)_4, \dots, (\Delta T_{\text{Fe}}/\Delta t_s)_i, i = 3 \dots 15 \text{ – для зразка заліза.}$

Для цього видалили знімки 0...2, тому що в ці моменти охолодження поверхонь ще не почалося, а також знімки 16...29, оскільки поріг чутливості ЦФ становить приблизно 500°C. Далі розраховували невідому теплоємність заліза c_{Fe} в інтервалі температур 600...672°C за методом охолодження [6], використовуючи залежність

$$c_{\text{Fe}_i} = c_{\text{Cu}_i} \frac{m_{\text{Cu}} (\Delta T_{\text{Cu}} / \Delta t_s)_i}{m_{\text{Fe}} (\Delta T_{\text{Fe}} / \Delta t_s)_i}, \quad (2)$$

де c_{Cu} – відома питома масова теплоємність міді при певній температурі, Дж/(кг·К); ΔT_{Cu} , ΔT_{Fe} – різниці температур поверхонь обох зразків, °C; $\Delta t_s = 1500$ мс – інтервал зйомки; $i = 3 \dots 15$ – номер кадру.

Питома теплоємність міді c_{Cu_i} та заліза c_{Fe_i} для необхідних температур обчислювали за допомогою поліномів, якими апроксимували її значення [13]. Окрім цього, алгоритм передбачав розрахунок абсолютної Δc_{Fe} та відносної $\delta_{c_{\text{Fe}}}$ похибок визначення питомої масової теплоємності заліза.

Результати та обговорення. Тепловий контроль дефектів. Запропонований цифровий фотографічний метод теплового контролю металів при високих температурах та розроблений алгоритм обробки цифрових зображень теплового випромінювання поверхонь досліджуваних зразків сталі дали можливість ідентифікувати штучно внесені дефекти (рис. 6).

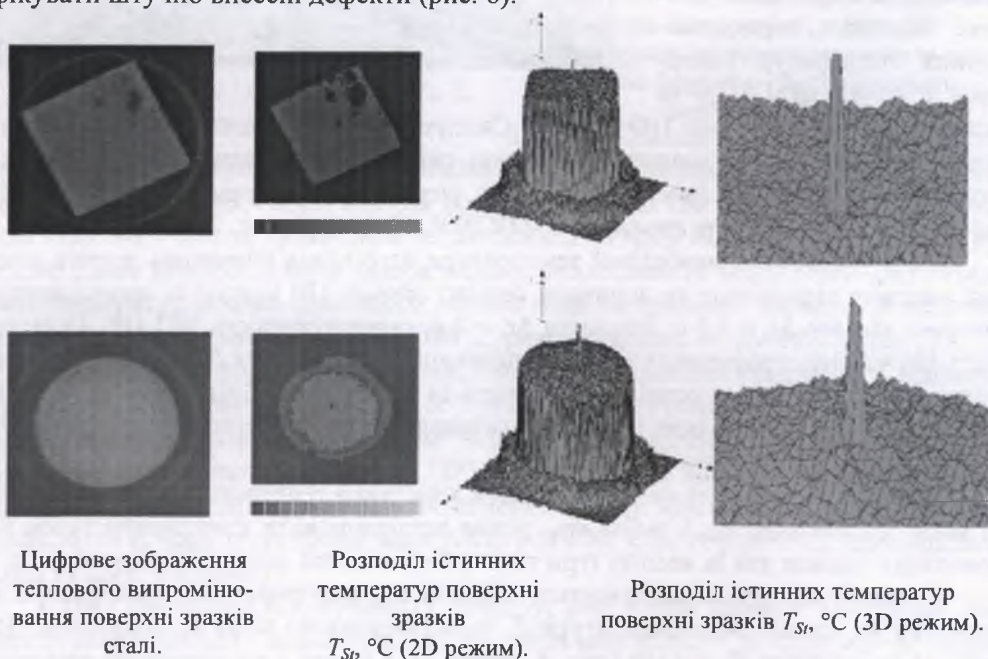


Рис. 6. Цифрові зображення теплового випромінювання зразків з дефектами.

З урахуванням масштабу фотографування, який становив 5,6:1 для даного розміщення ЦФ, та використаного об'єктива, на 1 мм² зображення приходить приблизно 256 пікселів, що свідчить про достатньо високу роздільну здатність розробленого методу теплового контролю, який дає можливість ідентифікувати дефекти з площею поверхні до 0,2 мм².

Слід відзначити, що, з одного боку, на інформативність методу суттєво впливає стан поверхні зразка, а з іншого – безпосередньо сама температура зразка, тому що за високих температур сталь починає окиснюватись та виникають кольори мінливості, тобто змінюється коефіцієнт випромінювальної здатності ϵ_{Sr} , причому неоднорідно. Проте вищеописані чинники впливу призводять до зниження температури поверхні зразка сталі, оскільки в той же час поверхня зразка над дефектом, нагрівається приблизно на 20...60°C більше (залежно від діаметра d та довжини l дефекту) проти всієї поверхні зразка, тому і вдається ідентифікувати дефекти. Це твердження справедливе лише для поданої схеми виконання експерименту з теплового контролю зразків сталі, тому що в деяких випадках дефекти також зумовлюють зниження температури поверхні контролю. Перегрів поверхні зразка над дефектом подано у вигляді піків на 3D графіках та яскравіших контурах на 2D графіках розподілу її істинних температур поверхні T_{Sr} .

Виявили, що усереднене значення температури поверхні над дефектом T_{Sr} (висота піка та яскравість контуру відповідно) залежить від його площі S (рис. 7). Також встановили взаємозв'язок між кількістю інформативних пікселів K цифрового зображення теплового випромінювання поверхонь зразків сталі, що свідчать про аномальну температуру, та площею S .

Дослідження, спрямовані на з'ясування характеру впливу форми зразків сталі на теплове випромінювання його поверхонь, свідчать, що їх форма майже не впливає на характер прояву дефектів за вказаної схеми теплового контролю. Проте зі збільшенням глибини свердлування штучних дефектів з 10 до 15 мм усереднене значення температури поверхні над дефектом T_{Sr} підвищується майже на 10°C.

Визначення теплоємності. Використовували цифровий фотографічний метод визначення теплоємності металів при високих температурах та створений алгоритм обробки цифрових зображень теплового випромінювання поверхонь зразків з заліза та міді, зіставили значення істинних термодинамічних температур їх поверхонь T_{CuTC} та T_{FeTC} з отриманими T_{Cu} , T_{Fe} за допомогою термопар та ЦФ (рис. 8).

Як видно з рис. 8а, б, значення T_{CuTC} та T_{FeTC} , отримані за допомогою термопар, дещо відрізняються від значень T_{Cu} , T_{Fe} , одержаних ЦФ, що насамперед пов'язано з тепловою інерцією використаних термопар типу ТХА, яка не перевищує в цьому випадку 2 с. Втім, нахил кривих температур для зразків міді T_{CuTC} , T_{Cu} та заліза T_{FeTC} , T_{Fe} майже збігається, що свідчить про достатньо високу точність їх вимірювання ЦФ. Максимальна відносна похибка вимірювання температури поверхонь зразків ЦФ становить: для міді – кадр № 5, $\delta_{T_{Cu}} = 3,23\%$; для заліза –

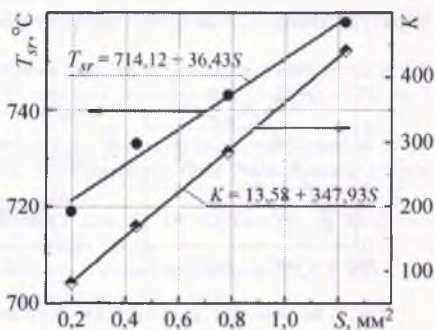


Рис. 7. Залежності кількості інформативних пікселів K та усередненого значення температури поверхні зразка над дефектом T_{Sr} від його площі S .

кадр № 8, $\delta_{T_{Fe}} = 3,76\%$. Для подальшого розрахунку теплоємності заліза c_{Fe} використовували значення температур поверхонь зразків, отримані за допомогою ЦФ, та виключили кадри 0...2 і 16...29.

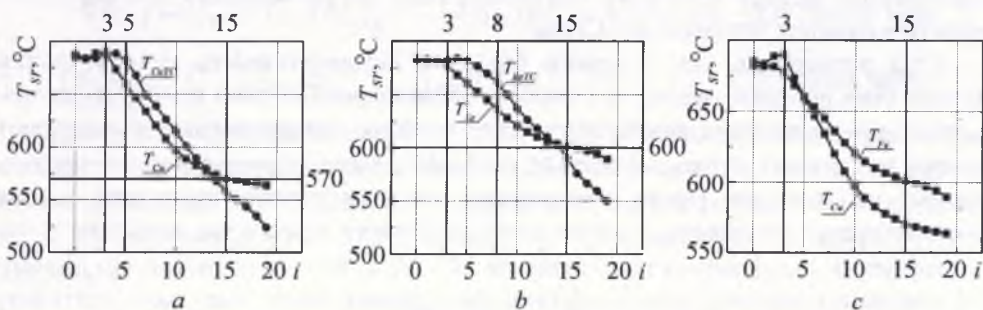


Рис. 8. Криві охолодження зразків міді (а) та заліза (б) та температур поверхонь зразків, визначених за допомогою ЦФ (с).

Встановили вигляд функцій $\Delta T_{Cu}/\Delta t_s = f(T_{srCu})$ для зразка з міді та $\Delta T_{Fe}/\Delta t_s = f(T_{srFe})$ для зразка з заліза (рис. 9), де T_{srCu} , T_{srFe} – усереднене значення температур поверхонь за інтервал часу зйомки $\Delta t_s = 1500$ мс.

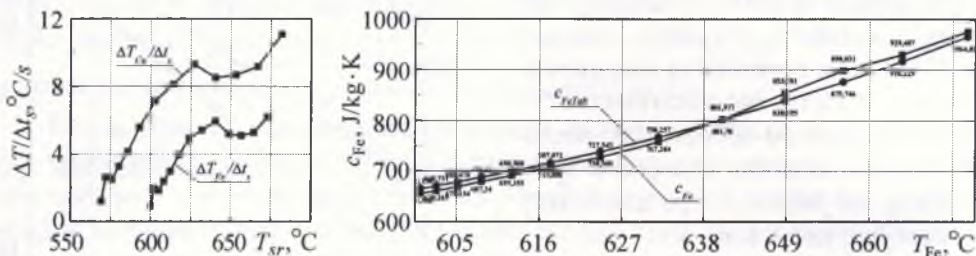


Рис. 9. Встановлені c_{Fe} та табличні значення теплоємності заліза c_{FeTab} , рекомендовані [13].

У результаті за формулою (2) розраховували невідому питому масову теплоємність заліза c_{Fe} в інтервалі 600...672°C.

Обчислені значення абсолютної Δc_{Fe} та відносної $\delta_{c_{Fe}}$ похибок визначення теплоємності заліза знаходяться в інтервалі, для абсолютної похибки Δc_{Fe} від – 9,66 до 22,28 Дж/кг·К, для відносної $\delta_{c_{Fe}}$ – від –1,42 до 2,54%. За істинну теплоємність заліза c_{FeTab} брали значення, рекомендовані в працях [13]. Як бачимо, максимальна відносна похибка визначення теплоємності заліза $\delta_{max c_{Fe}}$ за запропонованим способом складає 2,54%, що повністю задовольняє вимоги міждержавного стандарту з теплового неруйнівного контролю [14].

ВИСНОВКИ

Розроблено методи і алгоритми обробки даних цифрових зображень теплових випромінювань для ідентифікації прихованих дефектів сталі і встановлення питомої масової теплоємності заліза. Виявлено залежність усередненого значення температури поверхні над дефектом та кількості інформативних пікселів цифрового зображення теплового випромінювання від поверхневої площі дефекту. Запропоновані методи і алгоритми теплового контролю та визначення теплоємності металів дають можливість встановити взаємозв'язок між зареєстрованими аномаліями теплового випромінювання на поверхні об'єкта і параметрами його внутрішньої структури.

1. *Вавилов В. П.* Тепловой контроль. Неразрушающий контроль: Справ. в 7-ми т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – Т. 5. – 680 с.
2. *Зиновьев В. Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
3. *Излучательные свойства твёрдых материалов:* Справ. / Под. общ. ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
4. *Давиденко А. П., Славков В. Н.* Применение пакета MathCAD для исследования теплофизических свойств материалов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доп. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. / За ред. проф. Л. Л. Товажнянского. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2009. – Ч. 1. – С. 435.
5. *Славков В. М., Давиденко О. П.* Моделювання теплових полів об'єктів за допомогою програмного середовища MathCAD // Вісник Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2012. – № 18(189). – С. 218–227.
6. *Славков В. М., Давиденко О. П., Глушкова М. О.* Визначення теплоємності металів за допомогою цифрового фотоапарата // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1(45). – С. 210–212.
7. *Noncontact temperature measurement by means of CCD cameras in a participating medium / D. Liu, F. Wang, K. Cen, V. Yan, Q. Huang, V. Chi // Optics Letters. – 2008. – 33, № 5. – P. 422–424.*
8. *Jignesh D. Maun.* Thin-filament pyrometry with a digital still camera. – University of Maryland, 2006. – 38 p.
9. *Komarov P. L., Burzo M. G., and Raad P. E.* CCD Thermoreflectance Thermography System: Methodology and Experimental Validation // THERMINIC 12, Nice. – France, 2006.
10. *Saunders P.* Developing an imaging radiation thermometer // Automation and control. – 1998. – P. 16 – 19.
11. *Keanini R. G., Allgood C. A.* Measurement of time varying temperature fields using visible imaging CCD cameras // Int. communications in heat and mass transfer. – 1996. – 23, № 3. – P. 305–314.
12. *Ракчеева Л. П.* Измерение температуры нагретых тел с высоким пространственным разрешением с помощью цифрового фотоапарата. Методическое пос. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ckp.lab2.phys.spbu.ru>.
13. *CODATA key values for thermodynamics / Eds.: J. D. Cox, D. D. Wagman, V. A. Medvedev* – New-York; Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1989. – 272 p.
14. *Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. ГОСТ 23483-79.* – [Действующий от 01.01.1980]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 16 с.

Одержано 21.01.2015